La Percepción del Color

José Cortés Parejo. Abril 2000

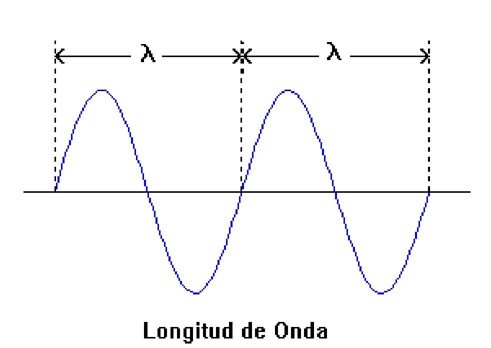
En la actualidad, cualquier persona que trabaje con un ordenador está acostumbrada al uso intensivo del color, tanto en las imágenes y gráficos que aparecen en la pantalla del monitor, como en las ,obtenidas en impresoras.
Probablemente, casi nadie se pregunta cómo se produce el color en el monitor o en la impresora. Se da por hecho que el color *está allí*. Cuando alguien ve una imagen en su pantalla, y en ella una zona de color amarillo, casi con toda seguridad piensa que el monitor está emitiendo luz amarilla en esa zona, lo cual no es cierto en absoluto, dado que su monitor sólo puede emitir luz roja, verde o azul. En realidad se trata de una especie de engaño: cuando nuestro ojo recibe simultáneamente rayos de luces rojas y verdes, tiene la sensación de estar viendo amarillo.
Lo mismo sucede en una imagen producida en una impresora (aunque el mecanismo visual es completamente distinto). Podemos ver una zona de color verde cuando realmente no existe ni una sola gota de tinta verde. La sensación del verde se tiene al ver por reflexión gotas de tinta cyan (turquesa) y amarillo, situadas muy cerca unas de otras.
Para la mayoría de la gente, las anteriores son cuestiones meramente técnicas, que no necesita conocer ni considerar, de la misma forma que no necesita saber cómo funciona un motor de explosión para poder conducir un coche.
Sin embargo, para todo aquél que trabaje en aplicaciones gráficas o sencillamente desarrolle aplicaciones que en definitiva van a mostrarse en la pantalla de un monitor y quizás en una impresora, es altamente conveniente conocer la forma en la que se genera el color en el monitor o se reproduce en una impresora.
De este modo comprenderá por qué, por ejemplo, un monitor no puede mostrar muchos colores que existen en la naturaleza (menos aún una impresora) y por el contrario, puede emitir más colores de los que el ojo es capaz de diferenciar en determinadas tonalidades.
Asímismo, es importante entender las diferentes sensibilidades del ojo a colores distintos.
A modo de ejemplo, no debería diseñarse una aplicación en la que zonas de detalle fino o que requieran gran atención del usuario (cursores), sean de color azul: en la gama de los azules es donde el ojo es menos sensible.
En las siguientes líneas nos apartaremos de los aspectos informáticos del color para adentrarnos en las causas que producen el color y cómo éste es percibido por el ojo humano. Con ello se tendrán las bases para entender cómo se genera el color en un monitor, cómo lo reproduce una impresora y las deficiencias de ambos dispositivos con respecto a las fuentes de emisión naturales y los receptores ópticos del ojo.

Generación del Color

Lo primero que debe hacerse a la hora de estudiar los orígenes del color y sus causas es constatar un hecho aparentemente contradictorio: el color no existe. No es una propiedad física de los objetos.
En contra de lo que generalmente se piensa, las cosas no son de un color determinado. La hierba no es verde, sino que nos parece verde. Una amapola no es roja, nos parece roja. El color es una sensación subjetiva del cerebro y sólo perceptible para aquellos seres vivos con un cerebro suficientemente desarrollado (humanos, primates y algunas especies excepcionales).

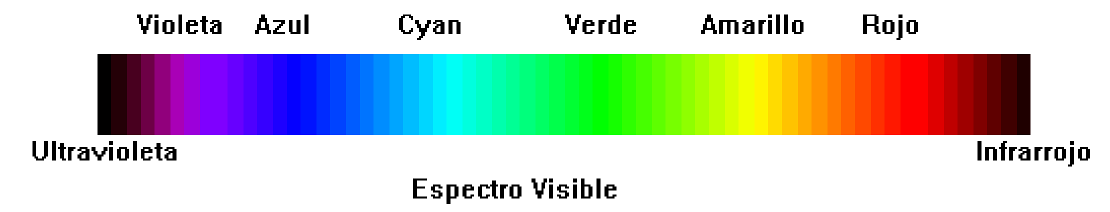
En realidad, para poder "ver" una escena cualquiera, basta con que exista una fuente emisora de radiación electromagnética que "ilumine" la escena; un dispositivo receptor que capte la radiación reflejada por los objetos y un "procesador" que interprete los resultados.
En el anterior párrafo se han omitido intencionadamente las palabras "luz" (radiación electromagnética), "ojo" (dispositivo receptor) y "cerebro" (procesador).
En efecto, podemos "ver" perfectamente un objeto en la más absoluta oscuridad sin más que "iluminarlo" con una fuente emisora de ondas de radio y disponiendo de un sistema que capte las ondas reflejadas en el objeto. La interpretación final de estos datos para "dar forma" al objeto podría realizarla un ordenador.
Un procedimiento similar se sigue, por ejemplo, en los microscopios electrónicos: el objeto a fotografiar se "ilumina" con un haz de electrones, se mide la radiación reflejada y se procesa la información para detectar las formas del objeto.
En definitiva, el ojo no es más que un dispositivo receptor de ondas electromagnéticas que responde a un cierto tipo de radiación y no a otros, de la misma forma que un receptor de radio es sensible a las ondas hertzianas, pero no lo es a las ondas emitidas por una bombilla. Esta comparación quizás puede parecer exagerada, pero lo cierto es que desde un punto de vista estrictamente físico, las ondas de radio y las emitidas por una bombilla son exactamente la misma cosa. Decir que una luz es "roja" tiene tan poco sentido como hablar del color de las ondas de radio.

Entremos por un momento en el fondo de la cuestión:
Una radiación electromagnética es el *efecto* o *vibración* producido por la interacción entre un campo eléctrico y otro magnético. Este efecto podemos representarlo mediante una onda sinusoidal caracterizada principalmente por su amplitud (que sólo afecta a la *Intensidad* de la radiación) y sobre todo, por su ***longitud de onda***, que no es sino el periodo espacial de la onda. Es este parámetro, inversamente proporcional a la ***frecuencia*** a la que vibra la onda, el causante de que el "efecto" que produce la onda al atravesar el espacio sea uno u otro.



Longitud de Onda

Existen ondas electromagnéticas que *vibran* a baja frecuencia. En consecuencia, su longitud de onda es bastante grande. Por ejemplo, es el caso de las ondas de radio, con una longitud de onda de entre 1 metro y 10 Kilómetros.
Las ondas de *radar* poseen mayor frecuencia de vibración y su longitud de onda es menor, del orden de 1 centímetro.



Espectro Visible

A partir de longitudes de onda de aproximadamente 0.76 milésimas de milímetro, los receptores de nuestros ojos comienzan a detectar la radiación (es decir, son sensibles a ella), y a partir de longitudes de onda de 0.38 milésimas de milímetro, dejan de detectarla: es lo qe llamamos *luz visible*.

Existen aún ondas que vibran a mayor frecuencia y sus longitudes de onda, más pequeñas. Por ejemplo, los rayos X, con una longitud de onda del orden de las millonésimas de milímetro. Con estos tamaños de longitudes de onda es tedioso trabajar en milímetros, por lo que se prefiere el *Nanometro*, que es la millonésima parte del milímetro. De esta forma, diremos que el *rango visible* para el ojo humano se encuentra entre 380 y 760 nanometros, rango estrechísimo teniendo en cuenta la gran cantidad de ondas que podemos producir entre las diezmilésimas de nanometro de los rayos gamma a los kilómetros de las ondas de radio.

Cuando contemplamos la hierba, lo único que sucede es que la radiación solar (que contiene multitud de ondas, incluyendo rayos X y rayos Gamma) es absorbida por la hierba y las **características eléctricas** del material constituyente de la hierba hacen que se re-emitan sólo aquellas ondas con longitudes de aproximadamente 550 nanometros. Estas entran dentro del rango detectable por nuestros fotoreceptores, por lo que al ser excitados enviarán información al cerebro. El cerebro (y sólo él) nos dirá que la radiación recibida es "verde". El concepto "verde" no puede existir como propiedad física de la hierba. Si en vez de iluminar la hierba con luz solar se hubiera hecho con otra fuente de radiación, podríamos percibirla con un color distinto, por ejemplo "rojo" (de nuevo el concepto "rojo" sólo existiría en nuestro cerebro, no sería evidentemente una propiedad del material hierba).
Arriba se han subrayado las palabras "características eléctricas". Es importante hacer notar que el conjunto de ondas que re-emite un material cuando está sometido a una determinada fuente de radiación electromagnética depende exclusivamente de las propiedades eléctricas del material. Esto puede parecer sorprendente, pero sencillamente es así. Cuando en informática gráfica se desean simular objetos con apariencia real, es fundamental simular correctamente el comportamiento de la luz cuando incide en dichos objetos, cómo sus propiedades eléctricas se combinan con el campo eléctrico de la onda y cómo se generan nuevas ondas con longitudes distintas de las incidentes. Esto, sin embargo, será objeto de otro artículo.

Para terminar esta sección, volvemos a insistir en que la luz visible, tanto si proviene directamente de una fuente como el sol, o aparece reflejada en un objeto, no es más que radiación electromagnética, dentro de una rango de longitudes de onda, que es capaz de excitar los fotoreceptores del ojo. El color no existe en la naturaleza, ni siquiera en nuestros ojos; sólo en nuestro cerebro.

Percepción del Color

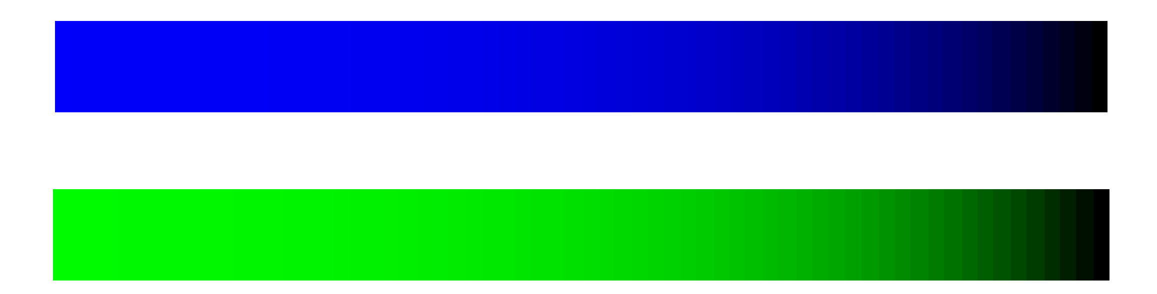
El ojo humano tiene en la retina 2 tipos de sensores a la radiación electromagnética: los ***Bastones*** y los ***Conos***.
Los *bastones*, de los cuales poseemos más de 100 millones, son células que sólo detectan el número de fotones (cuantos de luz) que llegan a éllas, independientemente de la longitud de onda de la radiación (siempre que ésta se encuentre dentro del rango en que son sensibles, es decir, 380 a 760 nanometros). Con ellas podemos ver detalle muy fino, debido al elevado número de *detectores*, y además, son muy sensibles, por lo que podemos discernir entre variaciones muy pequeñas de intensidad.
Sin embargo, está claro que con estas células sólo obtenemos imágenes "en Blanco y Negro", dada su incapacidad para diferenciar distintas longitudes de onda.
Este es el único tipo de fotoreceptor que se encuentra en la mayoría de los animales, a causa de lo cual sólo pueden percibir el mundo que les rodea en blanco y negro.

Los *conos*, que no llegan a 7 millones, son por su parte células sensoras mucho más especializadas que sólo aparecen en el ojo del hombre y los primates. De la misma forma que los bastones, únicamente detectan el número de fotones que llegan a ellas; pero este número detectado es diferente según la longitud de onda de la radiación. A los especialistas en la materia les gusta decir que los conos son *ciegos al color*, queriendo con ello subrayar que ni siquiera estas células especializadas son capaces de distinguir longitudes de onda diferentes. La información captada por los conos necesita ser ***post-procesada*** para *deducir* la longitud de onda que las excitó. Esta deducción es materia exclusiva del cerebro, por lo que aquí merece la pena volver a recalcar que es el cerebro y sólo él, el que consigue descifrar la composición espectral (proporción de cada longitud de onda) de la radiación recibida por los fotoreceptores. Como veremos más adelante, tampoco esto es cierto: en realidad el cerebro genera sensaciones especiales para unos pocos pigmentos o tintas a los que "adorna" con cualidades como "brillo" o "saturación".
Pero veamos algo más sobre los conos y su funcionamiento:

Existen 3 tipos de conos, los cuales suelen denominarse L, M y S, que corresponden en inglés a las iniciales de Long, Medium y Short. Esto no se refiere al tamaño de los conos, sino a la *longitud de onda* en la cual poseen máxima sensibilidad.
Los conos L, aunque son sensibles a todas las longitudes de onda en el rango 380-760 nanometros, presentan máxima respuesta (captan más fotones) cuando son excitados por radiación de 560 nanometros, decreciendo esta respuesta para longitudes de onda menores o mayores.
Dado que si una fuente de radiación emite a 560 nm. nuestro cerebro (tras el post-proceso) la describiría como "roja", a veces; pero de forma muy inapropiada, a los conos L se les denomina conos "rojos".
En este artículo utilizaremos esta denominación por ser más descriptiva, pero hay que insistir en que ningún cono puede detectar e identificar por sí solo la luz roja y, lo que es más importante, los conos L o rojos son sensibles y mucho a radiaciones con longitudes de onda que el cerebro describiría como "verdes".
Por su parte, los conos M poseen máxima sensibilidad a las longitudes de onda en torno a 530 nm, radiación que el cerebro describe como "verde", por lo que también se les llama "conos verdes".
Finalmente, los conos S tienen respuesta máxima a 420 nm., luz que se nos presenta como azul y de ahí su denominación de "conos azules".
Hay que indicar, para recalcar lo inapropiado de estas denominaciones, que los conos "verdes" son más sensibles a la radiación de 420 nm que los propios conos "azules", por lo que las luces "azules" las vemos en realidad mejor con los conos verdes que con los azules.

Otra cuestión importante, sobre todo a nivel de aplicaciones, es la del porcentaje y distribución en la retina de los 3 tipos de conos:
Alrededor del 60% son *rojos*, el 30% *verdes* y sólo el 10% *azules*. Para complicar más las cosas, además su distribución no es uniforme.
Partiendo de que el campo visual del ojo abarca aproximadamente 60º, la mayoría de los conos *rojos* y *verdes* se encuentran en una estrecha región de únicamente 10º denominada la *Fóvea*. En esta zona, los conos *azules* son prácticamente inexistentes. Fuera de la fóvea, nuestra sensibilidad al color decrece dramáticamente.
Aproximadamente a 10º respecto del centro de la retina, el número de conos es de sólo el 1% del número de ellos en la fóvea. Podemos decir, sin exagerar demasiado, que fuera de una campo de 20º vemos casi en blanco y negro (con tintes azules, debido a la presencia de conos azules).

No debería sacarse la conclusión de que en la zona de máxima sensibilidad (la fóvea) nuestro ojo es incapaz de detectar el azul: ya se ha dicho que los conos *verdes* son más sensibles al azul que los propios conos *azules*. Sin embargo, sí es cierto que, de manera global y teniendo en cuenta la escasez de conos azules, somos mucho menos sensibles a los azules que a los verdes o los rojos. Por otra parte, tenemos máxima sensibilidad a los verdes, dado que los conos *rojos* son a su vez muy sensibles al verde, con lo que aportan información adicional "verde" a la obtenida por los conos *verdes*.



Como puede verse (valga la expresión), el sistema fotoreceptor del ojo es bastante complejo, con lo cual no es de extrañar que la información captada por los conos (número de fotones) deba ser convenientemente post-procesada.
Este post-proceso constituye lo que se denominan *mecanismos de 2º nivel* y ocurre exclusivamente a nivel cerebral, lo cual redunda una vez más en la afirmación de que los ojos, o los conos, no pueden ver ni detectar el color: el color es un invento del cerebro.

Mecanismos de 2º nivel

La forma en que el cerebro procesa la información facilitada por los conos es sólo de relativo interés para los objetivos de este artículo. Sin embargo, conviene conocerla sucintamente, pues tiene algunas aplicaciones prácticas.
Por ejemplo, una conclusión que puede obtenerse de la anterior sección es que, a nivel básico, nuestros ojos (en realidad nuestro cerebro) detectan principalmente 3 colores: el rojo, el verde y el azul. Es decir, teóricamente, a cualquier radiación dentro del rango visible se le podría extraer la información "roja", la "verde" y la "azul" o, dicho de otra forma, los colores básicos serían el rojo, el verde y el azul y todos los demás podrían obtenerse (a nivel cerebral) combinando estos 3 básicos.
Sin embargo, si a una persona se le pregunta cuántos colores básicos existen, lo más probable es que conteste que 4: rojo, verde, azul y amarillo. ¿Por qué sucede esto?
La respuesta está en los *mecanismos de 2º nivel*, también llamados *canales cromáticos*:
En primer lugar, el cerebro compara (restando) las respuestas eléctricas enviadas por los conos *rojos* y *verdes* y genera lo que se denomina un *canal verde/rojo*.
El segundo mecanismo o *canal azul/amarillo* se genera comparando la información de los conos *azules* con la **suma** de de la información aportada por los conos *rojos* y *verdes*.
Finalmente, la suma anteriormente calculada se suministra a un 3er. canal llamado *canal de luminancia*.
Estos 3 *canales cromáticos* son procesados en una etapa posterior constituida por los *mecanismos de 3er. nivel*, siendo en esta última etapa en la cual nuestro cerebro "inventa" la amplia gama de colores que estamos acostumbrados a ver.
Pero antes de pasar a la 3ª Fase veamos algunas conclusiones:

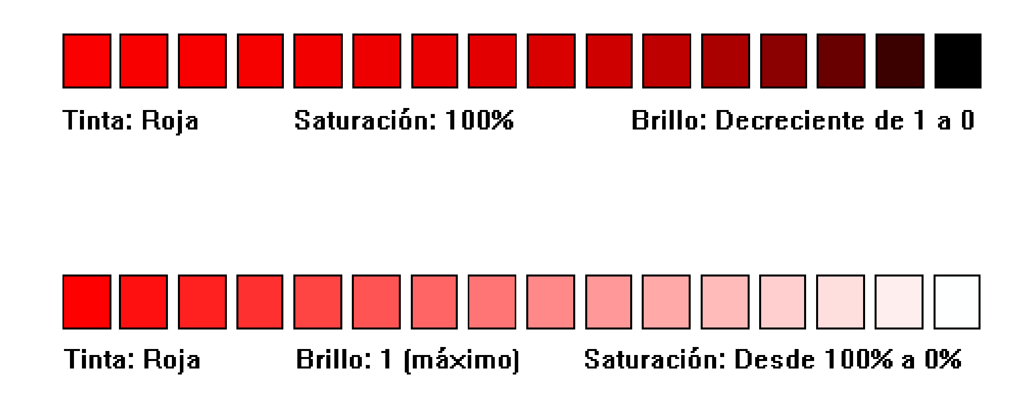
Debido a los mecanismos de 2º nivel es por lo que podemos apreciar que los verdes son "muy distintos" de los rojos (pues el cerebro genera, a través del canal verde/rojo, precisamente la diferencia entre estas señales).
Por otra parte, la suma de las "componentes" rojas y verdes de una radiación puede conseguirse siempre suministrando al ojo una única radiación de alrededor de 600 nm, que interpretamos como amarilla. Por tanto, el 2º canal antes descrito genera explícitamente "información amarilla" y a su vez la compara (es decir, la distingue) de la "información azul".

Mecanismos de 3^er^ nivel

Los *canales cromáticos* generados en el 2º nivel permiten al cerebro una clasificación previa de la radiación recibida en la forma de radiación "verdosa", "rojiza", "azulada" o "amarillenta". Es lo que se denomina *tinta* o *pigmentación* (en inglés *Hue*).
Por ejemplo, si observamos un campo con hierba, diremos que la sensación predominante es "verde", a pesar de que habrá cientos de verdes; es decir, muchas radiaciones distintas y con longitudes de onda distintas; pero todas aportando información principalmente al canal verde/rojo.
Una vez clasificada la radiación por su *tinta*, el *canal de luminancia* aporta la luminosidad o brillo de la tinta.
La información de los *conos azules* no interviene aquí: la componente azul de una radiación no dice nada nada sobre lo brillante que es.
Finalmente, el *canal azul/amarillo* (que recordemos, calculaba la diferencia entre la señal azul y la suma de la verde y la roja) es el que informa de cuánta "cantidad de Blanco" posee la radiación, entendiendo por "Blanco" la sensación producida por una radiación conteniendo todas las longitudes de onda y en igual proporción.
Esta "cantidad de blanco" es lo que interpretamos como *Saturación* de la radiación. Es lo que nos hace sentir que una amapola o una rosa, siendo ambas clasificadas como "tinta roja", en el primer caso la tinta roja está muy saturada mientras que en el caso de la rosa, la radiación "contiene mucho blanco" y el rojo está por tanto desaturado.

Verde Amarillo Cyan Rojo Azul Magenta

Tintas principales
Colores primarios y sus mezclas



Para terminar, notemos que la anterior discusión se ha centrado casi exclusivamente en el papel desempeñado por las células denominadas *conos*, las cuales son las únicas responsables de que podamos percibir el color.

No hay que olvidar que la retina posee, en proporción 15:1, otro tipo de células, los *bastones*, mucho más sensibles que los conos, y que aportan información espacial muy precisa al ser capaces de diatinguir entre puntos muy cercanos de la escena que miramos simplemente porque reflejan intensidades ligeramente distintas.
Para entendernos, nuestra retina obtiene una imagen en blanco y negro de muy alta resolución a la cual superpone otra imagen en color de bastante menor resolución.

Generación y medición del Color

En las secciones anteriores se ha esbozado el procedimiento seguido por el ojo para captar el *color*. Teóricamente, y con la tecnología hoy existente, podemos construir dispositivos que imiten a la perfección la respuesta de los conos a la radiación. Es decir, puede efectivamente construirse un fotoreceptor que reaccione a la luz en el rango 380-760 nm. exactamente en la misma forma en que lo hace un cono *verde* (por ejemplo). De hecho, así funcionan (aproximadamente) las cámaras digitales CCD.
Si la información recogida por estos fotoreceptores pudiera ser enviada **directamente al cerebro** (como lo hacen los conos), habríamos construido un dispositivo perfecto de captura, almacenamiento y procesamiento del color sin más que intercalar un ordenador o procesador entre la fase de captura y la de interpretación de resultados por parte del cerebro. Sin duda, algún día se harán así las cosas. Una escena cualquiera, un paisaje, se fotografiará con una cámara que obtenga exactamente la misma información cromática, en forma de señales eléctricas, que la que obtendría el ojo humano. Esto puede hacerse y de hecho se hace en la actualidad incluso con mayor precisión que la que tiene el ojo. Sin embargo, no podemos aún enviar esta información directamente al cerebro (aunque ya se han dado los primeros pasos al respecto).
La consecuencia inmediata y desafortunada es que esta información cromática de alta calidad obtenida por la cámara necesita por ahora "ser vista" por nuestros ojos (en contraposición a "ser enviada directamente al cerebro"). Esto quiere decir que necesitamos traducir la información numérica a un *dispositivo productor de color*. Y aquí está el problema: en la actualidad no podemos producir color (al menos con un coste razonable) exactamente en la misma forma en que fue captado por la cámara.
El dispositivo ideal sería una especie de monitor con una resolución similar a la del ojo (cientos de millones de pixels) y de modo que en cada pixel pudiera emitirse una distribución espectral determinada, esto es, una radiación con una composición específica de distintas longitudes de onda en una proporción dada.

El tema de la resolución no es demasiado problemático, sin embargo sí lo es el de la generación de distribuciones espectrales arbitrarias (en cada pixel). Hoy por hoy no puede hacerse si no es a un coste astronómico.
Lo más que se ha conseguido es intentar excitar de forma independiente a los conos rojos, verdes y azules produciendo radiación monocromática (de un única longitud de onda) en la longitud de onda en la que la sensibilidad de un determinado cono es máxima. Sin embargo, existen distribuciones espectrales que no pueden generarse combinando la radiación de estos 3 emisores y esto puede comprobarse con un simple experimento: una fuente de luz de un láser puede ajustarse a una longitud de onda específica de modo que no podamos reproducir su color utilizando emisores "rojos", "verdes" y "azules".
A pesar de todo, ocurre un fenómeno curioso: si a la fuente de luz láser que emite un color irreproducible se le superpone nuestro emisor de rojo, se genera un nuevo *color* que sí puede imitarse utilizando sólo los emisores verde y azul.

Llamando R, G y B (iniciales de *Red*, *Green* y *Blue*) a la radiación generada por unos emisores de rojo, verde y azul, resulta que un cierto color C no puede expresarse como combinación de ciertas proporciones de R, G o B:

No existen a, b, c tales que C = a R + b G + c B

Sin embargo, si al color C le añadimos una cierta proporción de rojo, el resultado si puede expresarse como combinación de G y B:

$$C + p R = q G + r B$$

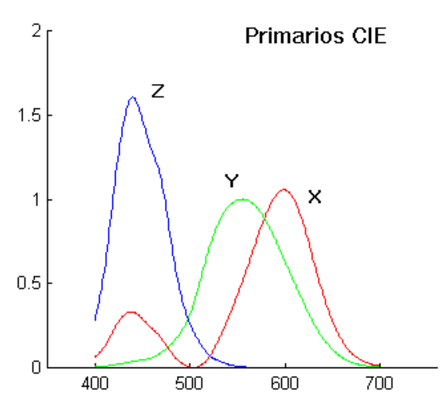
o lo que es lo mismo: C = q G + r B - p R

Esto es sorprendente. Aunque matemáticamente correcta, la anterior igualdad es una imposibilidad física: expresa que el color C puede reproducirse mediante los emisores de verde y de azul, pero <u>restando</u> a la radiación resultante una cierta proporción de la radiación del emisor rojo.

Sin embargo, la ecuación anterior es de extraordinaria utilidad a la hora de medir el color, pues expresa que cualquier color puede "generarse", a nivel numérico, como combinación de sólo 3 colores básicos, aunque quizás uno de ellos haya que combinarlo *negativamente*.

Numéricamente no existe ningún problema: si decimos que un determinado color C se genera con un 60% de la intensidad del emisor G, un 30% del emisor B y un -20% del emisor R, en realidad queremos decir que si al color C le añadimos un 20% de luz roja, el resultante color puede obtenerse mexclando un 60% de verde con un 30% de azul.

Esto de utilizar combinaciones negativas de colores no pareció gustar mucho a los miembros de la *Comisión Internacional del alumbrado* (Commission Internationale de L'Eclairage o **CIE**) encargada de estandarizar la especificación de los colores, y no se les ocurrió otra idea mejor que inventarse un emisor falso de rojo (imposible de construir).

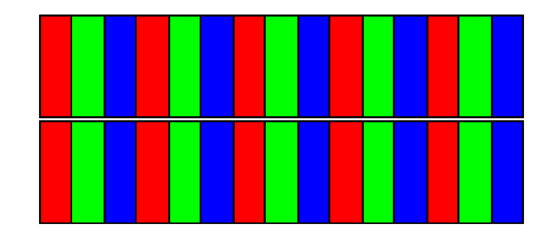


De esta forma se establecieron 3 emisores estándar, denominados X, Y y Z (estándar CIE) definidos mediante una curva que indica para cada color monocromático (es decir, para cada longitud de onda), qué proporción de X, Y y Z hay que tomar para reproducirlo, siendo las proporciones siempre positivas. Hay que comentar que, ya puestos, los colores Y y Z son también falsos, aunque más parecidos a los emisores verde y azul de lo que es el color X al rojo.

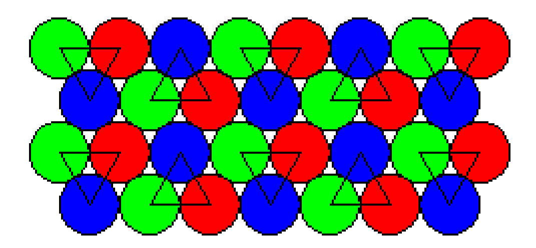
Esto no debería ser fuente de confusión, pues matemáticamente no existe ningún problema en considerar colores falsos para producir colores reales.

En conclusión, mientras no pueda construirse el dispositivo ideal mencionado al principio de esta sección, o bien puedan enviarse señales directamente al cerebro, nos tendremos que conformar con dispositivos generadores de color basados en 3 emisores primarios, que no pueden reproducir todos los colores, pero que sí bastan para generar la mayoría de los que aparecen en la naturaleza.

En las siguientes figuras pueden apreciarse los 2 sistemas usuales de distribuir los *pixels* en un monitor utilizando 3 colores primarios.



Disposición de fósforos Sistema Trinitron



Disposición de fósforos en Delta

Incidentalmente, merece la pena comentar aquí que, si utilizaramos un cuarto emisor para tratar de solapar todo el rango de colores, lo único que conseguiríamos sería aumentar el número de colores reproducibles; pero seguirían existiendo colores irreproducibles.
Para terminar esta sección es preciso comentar que todo lo dicho anteriormente se refiere a emisores generadores de radiación. Disponemos de un segundo procedimiento para enviar información cromática a los ojos: si queremos generar un color determinado, podemos utilizar una fuente de luz blanca (conteniendo todas las longitudes de onda en iguales proporciones) y construir un material específico que absorba todas las longitudes de onda excepto las correspondientes al color deseado, que serían reflejadas. Este es el procedimiento seguido en impresión: un material que refleja luz blanca (papel) es pintado con pigmentos coloreados para crear, a nivel local, un nuevo material que absorbe todas las longitudes de onda excepto digamos la correspondiente al verde.
Aunque el resultado final es el mismo que si se estuviera emitiendo luz verde, existen importantes diferencias en la forma de generar colores mediante emisión o mediante reflexión. Por ejemplo, ya hemos visto que que si se superponen rayos de luz verde y roja, nuestro cerebro interpretará el resultado como amarillo. En cambio si se mezcla pintura verde y pintura roja, no obtendremos pintura amarilla, sino negra (gris).
Esto sucede porque al incidir luz blanca, el material constituyente de la pintura verde absorbe las longitudes de onda correspondientes al rojo y el azul y re-emite las correspondientes al verde. Pero al existir en la mezcla pintura roja, que absorbe el verde y el azul, resulta que al final no se re-emite nada, pues todas las longitudes han sido absorbidas. Por tanto, en impresión, los colores se producen restándole ciertas radiaciones a la luz blanca. En este sistema también se emplean 3 colores primarios pero, por razones que no viene al caso comentar aquí, no son el rojo, el verde y el azul, sino las mezclas de ellos (mezclas en el sentido de superposición de fuentes de luz); es decir, el amarillo (rojo + verde), el magenta (rojo + azul) y el cyan (verde + azul).

Referencias

Hall, R.
Illumination and Color in Computer generated Imagery. Springer Verlag (1989)

Travis, D.
*Effective Color Displays.*Academic Press (1991)

Watt, A.
*Fundamentals of Three-Dimensional Computer Graphics.*Addison-Wesley (1980)